# 溫室設計圖面建構與數值模擬分析應用

黃國祥*、陳俊仁*、李易樺**
*農業試驗所農業工程組助理研究員
**農業試驗所農業工程組研究助理

## 一、摘要

台灣位處於亞熱帶，夏季經常有颱風侵襲，冬季則有東北季風影響，近年來由於全球暖化與氣候變遷，致使強風與豪雨對作物栽培的威脅愈來越嚴重，故國內應用溫室進行農業生產將為未來趨勢。本研究調查並彙整國內溫室常用種類、型式，並以國內大量使用的溫室中，選擇具發展潛力的溫室型態，進行溫室標準圖面更新與數值模擬方法之建立。整合跨領域研究團隊的過程中，目前已完成簡易溫室之標準圖樣草案，並繪製簡易溫室之詳細圖，提供農民選用準則，為爾後本土溫室產業發展及主管機關訂定標準圖樣之參考。另外運用計算流體力學與結構力學之流固耦合模擬方法，建構溫室外部風場與結構強度的模擬分析流程，並以縮尺模型的風洞試驗來驗證數值模擬結果是否合理，也藉由數值化模擬分析技術的建立，進而對溫室結構接合元件、內部桁架與外部結構強化進行研究改良，初擬簡易溫室設計規範與資材標準化等資訊，協助提升簡易溫室的設計能力與製造技術。

**關鍵詞**：溫室結構、流固耦合分析、結構元件

## 二、前言

台灣現有簡易溫室結構型式多樣且水準參差不齊，製造承作業者搭建溫室皆以經驗法則來選用材料以及慣用工法來施作，並未對於溫室結構之抗風性或變形量進行學理探討與原則設計。而簡易溫室大量被使用於國內各蔬果產地，每當颱風季節到來，往往造成搭建不良之溫室產生損壞，應該具有保護作物功用的溫室，反而造成農民的更大的負擔。故本研究應透過對溫室結構與的適當設計與改善，減少溫室遭遇強風所產生的危害。因此研究中包含抗風型結構溫室設計及標準圖繪製，溫室外流場模擬與結構接合元件改良設計之建立，應用數值模擬分析技術建立溫室外部流場與結構強度之最佳化設計、結構接合元件受力分析及資材標準化等內容。

玉城磨(2011)針對西南島嶼的園藝設施於颱風後的損害進行調查，並分成四種損壞情形(1)混凝土基礎破裂(2)立柱底部破裂(3)主樑斷裂或鬆動(4)焊接區斷裂；為防止樑變形提出鋼繩加固的方法，並利用桁架結構分散整體結構受力[1]。森山英樹(2008)針對關東地區的北部沿岸農業設施於颱風後的損害調查，強風造成的破壞在於迎風面之拱架變形與基礎破壞後的向上拉拔力[2]。豐田裕道、森山英樹等人(1998)研究園藝

溫室耐風設計於風災後的調查狀況，結果顯示園藝設施抗風設計需考量骨架結構接合外，亦需考慮批覆材的強度，同時基礎部件的接合由於接近地面，防銹作業亦需注意[3]。張、黃等人(2016)調查台灣溫室遭受颱風侵襲後農業設施損害情況，其破壞可分為披覆材破損之輕度損害與結構彎曲斷裂為重度損害，另分析損壞成因，可發現由管材等接合元件破壞案例較多[4]。張(2013)以建築物耐風設計規範及有限元素分析軟體，進行溫室內部桁架結構耐風能力模擬分析[5]。Yukio Tamura和 Akira Katsumurae(2012)針對等效靜態風荷載(ESWL)的分佈進行研究，並討論ESWL的基本要素與必要條件，比較不同屋頂類型的最大荷載效應[6]。Yasushi Uematsu、Fumio Arakatsu 等人(2009)應用風洞驗證雙曲拋物面屋頂之風壓係數，根據風力與力矩的關係，提出了主抗風力系統的風壓係數，其中假設屋頂為剛性，其軸向力為風荷載的主要負荷效應[7]。喻萌(2007)應用有限元分析軟體 ANSYS 對輸流管在不同約束條件下進行流固耦合模擬計算，得到輸流管壁負載時之徑向位移、應力與支點反作用力等數值，可應用於管道系統的最佳化設計[8]。陳、朱等人(2014)為驗證複合材料螺旋槳流固耦合算法之正確性，應用 ANSYS/CFX 針對螺旋槳建立流體與結構模型，實現雙向流固耦合穩態求解，結果顯示數值計算符合試驗數據[9]。朱、林等人(2016)使用風洞實驗研究半圓形隧道式溫室的風力負載，研究結果發現最大風壓皆發生於溫室頂部，且其風壓係數符合建築物耐風設計規範及解說所建議之風壓係數[10]。

## 三、 各項成果說明

### 3.1 建立設施結構標準圖與元件資料

蒐集並試驗常用之市售結構鋞管規格尺寸(表 1)，及建立簡易設施拱架主柱之規格代號表，參考國內外法規以及溫室結構相關資料，以 3D 繪圖軟體繪製溫室主體結構、內部桁架與外部強化結構，並通過土木結構技師檢核，檢核內容依照建築技術規則、建築物耐風設計規範等標準進行結構計算，爾後完成簡易溫室結構暨施工參考圖(圖 1)，提供農委會相關單位公告此參考圖，協助農政單位輔導農民搭建改良設計之溫室。新設計之 U 型鋞管圓屋頂溫室於抗風級數 11 級風下，可減少成本約 5%，並提升抗風力約 4%。反之若增加 10%成本，則可提升至抗 15 級之颱風。

本研究除進行整體溫室的流場與結構分析外，另將結構接合元件部份分為桿件與桿件之間的接合，以及披覆材料與桿件之接合這二類來探討。在桿件與桿件間接合部份，以彈簧夾固定鋞管之夾持力進行拉力實測，探討其受拉力與位移量之相關性，作為改善簡易溫室結構耐風強度參考。本研究建構一拉力試驗平台以實際量測彈簧夾固定於鋞管上的夾持力，量測數據顯示彈簧夾短桿與長桿對鋞管的平均最大夾持力分別為 10.93kg、7.18kg；若彈簧夾處於未固定鋞管之無負載狀態下進行夾持力量測，彈簧夾短桿與長桿對鋞管的平均最大夾持力分別為 8.34kg、2.67kg。另外以相同之固定條件進行 1kg 至 20kg 拉力與位移之間的關係，當拉力未超過最大夾持力前，短桿與長桿承受拉力之平均位移量分別為 0.066mm/kg、0.101mm/kg；拉力超過最大夾持力後，短桿與長桿的平均位移量則為 0.919mm/kg、2.191mm/kg，此數值變化與彈簧夾

的彈簧剛度(k)有關，在固定位移下 k 值越大的彈簧，其拉力或推力的力量會越強，因此當彈簧夾受拉力超過最大夾持力時，將使短桿與長桿之 k 值皆大幅下降約 49%。試驗結果顯示彈簧夾長桿受力超過 7kg 時產生位移，超過 12kg 後長桿將脫離鋞管，當長桿脫離鋞管後，短桿對鋞管的夾持力也隨之下降，後續將造成彈簧夾固定失效，進而破壞整體結構的穩固性。另外披覆材料與結構接合之分析建立在接合元件足夠強之假設條件下，先建立簡化之模型，參考”建築物耐風設計規範與解說”設定溫室各牆面的承載風壓，並將受力藉由擠壓干涉傳遞至結構桿件之狀態分析，而結構承載之受(應)力分布更可進一步作為接合元件機械強度分析時之設定，並協助接合元件開發設計之條件。

表 1. 結構鋞管規格尺寸

| 構件 | 尺寸(mm) | 降伏抗拉強度 ($kgf/cm^2$) | E($kgf/cm^2$) | 單位重($tf/m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| 鋞管骨架 | 鋼管外徑 48.6、厚度 1.8 | 3500 | 2040 | 7.85 |
| 脊樑主管 | 鋼管外徑 21.2、厚度 1.5 | 3500 | 2040 | 7.85 |
| 桁條直管 | 鋼管外徑 21.2、厚度 1.5 | 3500 | 2040 | 7.85 |
| 山牆面管 | 鋼管外徑 48.6、厚度 1.8 | 3500 | 2040 | 7.85 |
| 山牆面兩側主管 | 鋼管外徑 75.6、厚度 2.3 | 3500 | 2040 | 7.85 |

表格來源：UP-540 簡易溫室結構計算書

圖 1. 簡易溫室結構參考圖

**3.2 應用流固耦合技術於設施抗風結構分析**

本研究將應用流固耦合(Fluent Structure Interaction, FSI)分析來探討外部流場對溫室結構之影響。本結構強度分析建立在接合元件足夠強之假設條件下，應用有限元素分析軟體模擬自由流風之溫室外部流場，並以受風影響之溫室表面風壓傳遞至結構桿件的狀態分析，並將模擬風壓值與”建築物耐風設計規範”進行比較分析，確認模擬結果尚符合規範之標準。模擬結果顯示，除屋頂中央區外，其餘牆面的風壓值皆小

於規範值，建築規範之拱形屋頂風壓值略低於模擬值約17%，背風面則因渦流產生而流速降低並提高壓力(圖2)；溫室結構強度分析於最大風級數13級風時，其最大位移在迎風面屋頂中央區達91.6mm，其次為右側山牆面位移達70.1mm，整體結構在中央拱架底部有最大應力值656MPa，屋頂結構接合處約有219MPa至260MPa的應力集中(圖3)。本研究運用流固耦合分析之有限元素數值模擬方法，模擬溫室外部流場、表面風壓與結構位移趨勢及應力分布狀況，藉由發展溫室抗風結構的數值化模擬分析技術，確立簡易溫室數值化模型設計參數原則，達成快速分析簡易溫室結構抗風強度之目的。

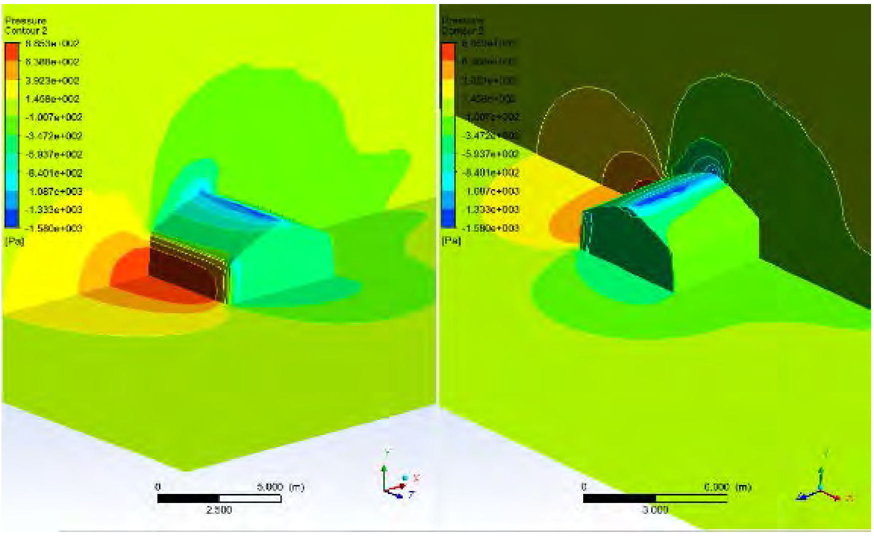


圖 2. 表面壓力分布與流場速度分布(溫室流場)

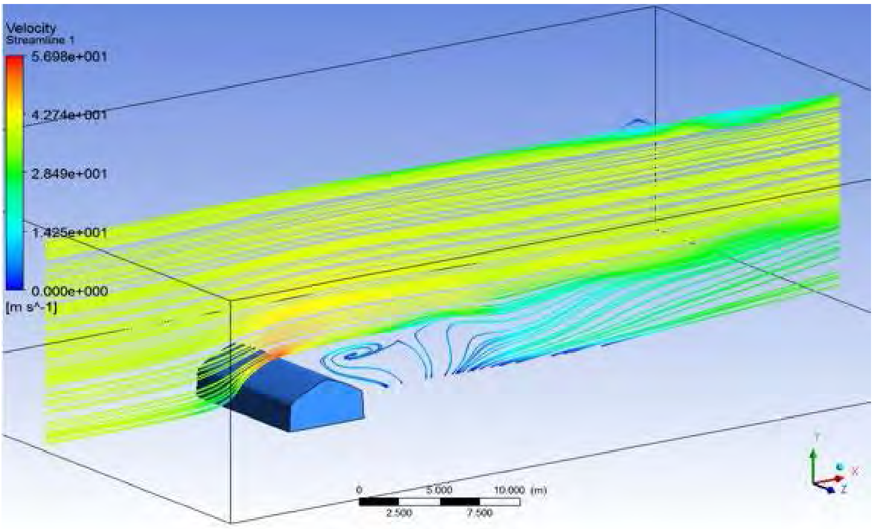


圖 3. 結構位移量分布與結構應力值分布(溫室結構)

**3.3 分析風災設施破壞原因並撰擬輔導文件**

針對颱風造成國內中南部及東部溫網室造成重大損失，蒐集分析受損原因，並蒐集國內設施形式及搭建工法資料，撰寫設施防災防熱文件、設施搭建施工注意事項。

產業服務方面為：

(1)配合設施服務團任務完成26件重建設施圖面檢視。

(2)提供農政單位設施搭建注意事項文件、搭建業者名單。

(3)參與設施搭建課程授課。

(4)委辦簡易設施結構計算。

產業效益方面為：

(1) 簡易式溫室結構快速結構分析方法與外流場受力分析方法。

(2) 接合元件型式調查與相關試驗，為材料與組件標準化之基礎。

(3) 建立施工注意事項供農民參用，提升設施搭建品質。

## 四、結論

溫室設計建造時，需考慮因地制宜的格局方位分布設計、結構設計、構件材料、基礎設施、搬運組裝、構件連結、使用維護等要項，相關之影響環節眾多，依據學理分析及實測驗證加以歸納統整，可以減少不確定因素，降低溫室損毀的風險及機率。本研究將設施結構、設施使用金屬材料、設施內外風場之問題進行研究與試驗，並建立電腦輔助設計與模擬方法，研發能量已大幅提升，而風洞試驗、金屬材料計畫則引進學界能量進入農業設施研究，所以本研究團隊為 105 年成立之設施技術服務團成員，已提供設施參考圖、設施搭建注意事項等政策之參用文件，後續更將應用所建立之研究能量協助國內農政單位建立設施規範，以輔導設施業者技術升級並減少設施風災損壞之現象。

## 五、參考文獻


1. 玉城麿。2011。西南諸島園藝設施因應颱風對策之研究。博士論文。日本琉球大學大學院理工學研究科。
2. 森山英樹。2008。溫室受風害與雪害之設計研究與改良。博士論文。日本筑波大學大學院生命環境科學研究科。
3. 豐田裕道、森山英樹、瀨能誠之、前川孝昭。1998。園藝用塑膠布溫室之特性於風災後案例分析。農業設施學會研討會。29卷1號。
4. 張金元、黃國祥、林建志、徐武煥。2016。溫室管夾結構分析之研究。2016農機與生機學術研討會。
5. 張金元。2013。應用耐風設計規範分析簡易設施結構之研究。102年度農業工程與

自動化計畫成果研討會論文集。P.20-P.25。

6. Yukio Tamura, Akira Katsumurae. (2012). Universal equivalent static wind load for structures. The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications. Shanghai, China. September 2-6.
7. Yasushi Uematsu1, Fumio Arakatsu, Satoru Matsumotoand Fumiyoshi Takeda. (2009). Wind force coefficients for the design of a hyperbolic paraboloid free roof. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei, Taiwan November 8-12.
8. 喻萌。2007。基於ANSYS的輸流管道流固耦合特性分析。中國艦船研究。2(5)：54-57,67。
9. 陳悅、朱錫、周振龍。2014。考慮鋪層的複合材料螺旋槳流固耦合計算及驗證。船海工程。43(2)：57-61。
10. 朱佳仁、林坦誼、楊智凱、劉明怡。2016。半圓柱形溫室風壓係數之實驗研究。農業工程學報。62(3)：63-73。